干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2007—2020年西藏草面温度时空分布特征

杜 军[1,2,3]， 高佳佳[1,2,3]， 王 挺[3]， 平措桑旦[1,2]

（1. 西藏高原大气环境科学研究所，西藏 拉萨 850001；2. 西藏高原大气环境研究重点实验室，西藏 拉萨 850001；3. 中国气象局墨脱大气水分循环综合观测野外科学试验基地，西藏 墨脱 860700）

摘 要：利用2007—2020年西藏38个气象站点平均草面温度（简称草温）、平均气温、平均地表温度、云量、降水量等观测资料，采用气候统计诊断方法分析了西藏草面温度的时空分异特征及其影响因素，以期科学研究当地草地生态系统和开展专业气象服务。结果表明：西藏年平均草温呈自东南向西北递减的分布。草温与海拔高度存在显著的负相关，海拔高度每升高100 m，季平均草温降低0.44~0.70 ℃，年平均草温降低0.58 ℃；与纬度有着显著的曲线关系，29.3°N以南（北）地区，随着纬度增加，草温随之升高（降低）。各站草温呈一峰一谷的日变化特征，日最低值出现在07:00—08:00（北京时间），日最高值均出现在14:00；草温月平均最低值都出现在1月，月平均最高值出现在6月或7月；76%的站点草温的变化为夏季>春季>秋季>冬季的气候特征。西藏草温年较差为21.4 ℃，较气温年较差偏大3.1 ℃；草温日较差达35.7 ℃，远高于气温日较差，偏大21.6 ℃。草温与气温之差以夏季最大，其次是春季、冬季两者比较接近；草温与地表温度之差以春季最大，夏季次之，冬季最小。在空间分布上，月平均草温与气温、地表温度均呈显著的正相关，与平均风速、积雪日呈显著的负相关；积雪深度对草温的影响，除冬季外二者存在显著的负相关；大部分月份平均草温与总云量、低云量、降水量的关系不显著。86.8%的站点5—9月平均逐小时草温与降水量存在显著的负相关关系。

关 键 词：时空分布；草面温度；影响因素；西藏

文章编号：

草面温度（简称草温）观测是测量近地层植被表面温度，较地表温度、气温更能代表近地层温度的自然状况[1-4]。按照地面气象观测规范，地表温度（0 cm地温）是裸露的地表温度，草温是离地6 cm处草层的温度，而气温是离地1.5 m百叶箱内的空气温度。气温、近地表温度、地表温度是一个温度循环系统，其中气温、近地表温度是因地表接收来自太阳直接辐射的同时，通过辐射、对流等形式，传导给近地表的空气。因此，气温、地表温度是影响草温的主要环境因子[5]。

自2006年下半年开始在西藏各站安装了草温观测传感器，增加了草温观测项目。草温是通过铂电阻温度传感器来测定，传感器安装在距地6 cm高度的草面上，并与地面平行，草地面积约1 m^2，观测区植被高度不能超过10 cm[1]。虽然草温是气象自动站新增加的观测内容，但国内针对草温时空分布、影响要素、质量控制等方面已有一些研究成果，如程爱珍等[6]分析了广西天气现象变化（辐射、云量、降水量、风）对草温变化的影响，并提出了草温观测的质控方法。张亚哲等[7]讨论了华北平原中部草温与地表温度、气温三者之间的变化关系。李秦等[8]认为新疆草温分布受纬度、海拔高度的影响比较明显，且日变化和季变化特征明显。马汝忠等[9]指出青海省草温变化呈东部高西部低、北部高南部低的特点，草温与气温、地温均呈显著的正相关，与总云量、低云量呈显著的反相关。温显罡等[10]研究

收稿日期：2021-08-01； **修订日期**：2021-10-25
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0106）；国家自然科学基金项目（41765011）；2019年西藏自治区科技重点研发计划“西藏主要地表特征科学考察及研究”资助
作者简介：杜军（1969-），男，高级工程师，主要从事青藏高原气候变化、生态与农业气候等方面的研究. E-mail: dujun0891@163.com

认为草温与露点温度差对露或霜结成具有指示性作用。巴珠等[11]、杨媚[12]分别浅析了西藏泽当和尼木单个站草温的变化规律。植被覆盖与地表温度是描述生态系统特征的重要参数[13],西藏植被覆盖[14-16]、地表温度[17-19]国内学者已有研究,而针对西藏草温时空变化特征的研究未见报道。为此,本研究利用2007—2020年西藏38个气象站点1—12月逐小时平均草温、平均气温和平均地表温度等资料,采用气候统计诊断方法,较系统地分析了草温的时空分布特征及其与气温、地表温度等气象要素的关系,这对科学研究当地草地生态系统、科学掌握和利用草温的变化规律,开展专业气象服务有着十分重要的意义。

1 资料与方法

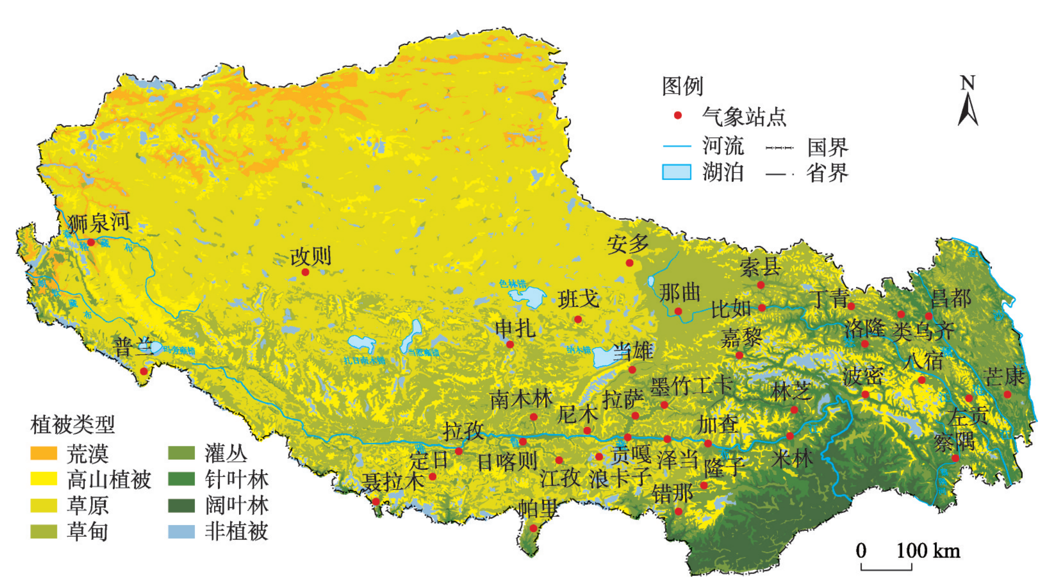
本研究选用2007—2020年西藏38个气象站点(图1)1—12月逐小时平均草温、平均气温、降水量、平均地表温度以及逐日总云量、低云量、平均风速等资料。资料来源于西藏自治区气象信息网络中心,均通过质量控制。

通过算术平均法建立了西藏四季(上年12月至翌年2月为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季)和年平均草温、气温、地表温度、总云量等序列,多年平均值为2007—2020年平均值。采用地理信息制图8.0软件(Golden Software Surfer 8)中的普通克里金(Kriging)插值法绘制要素的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 草温的空间分布

在多年平均状态下,西藏各地年平均草温为0.9~13.8 ℃,总体呈自东南向西北递减的分布(图2a),并随海拔高度升高而降低;最大值出现在察隅,最小值位于安多。其中,林芝市、沿雅鲁藏布江东段(拉萨至加查)和八宿等地在10.0 ℃以上;那曲市大部、阿里地区北部、帕里至错那一带低于5.0 ℃;其他各地在5.0~10.0 ℃之间。各地年平均最高草温为20.8~44.6 ℃,总体上呈自东南向西北递减的分布规律(图2b),但高值中心与年平均草温不同,位于山南市东北部。其中,林芝市、沿雅鲁藏布江一线、昌都和八宿等地大于30.0 ℃;那曲市西部、阿里地区、日喀则市西部以及错那小于25.0 ℃;其他各地在25.0~30.0 ℃之间。年平均最低草温的分布与年平均草温基本一致(图2c),介于-14.9~6.5 ℃之间,以察隅最大,安多最小。其中,林芝市和八宿在0 ℃以上,那曲市西北部低于-10.0 ℃,沿雅鲁藏布江东段、聂拉木至普兰一带、昌都市西南部等地为-5.0~0.0 ℃;其他各地为-10.0~-5.0 ℃。四季平均草温、平均最高草温和平均最低草温的分布格局与年尺度基本一致,纬度地带性和海拔地带性较为明显。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 西藏植被和气象站点分布

Fig. 1 Distributions of vegetation and meteorological stations in Tibet

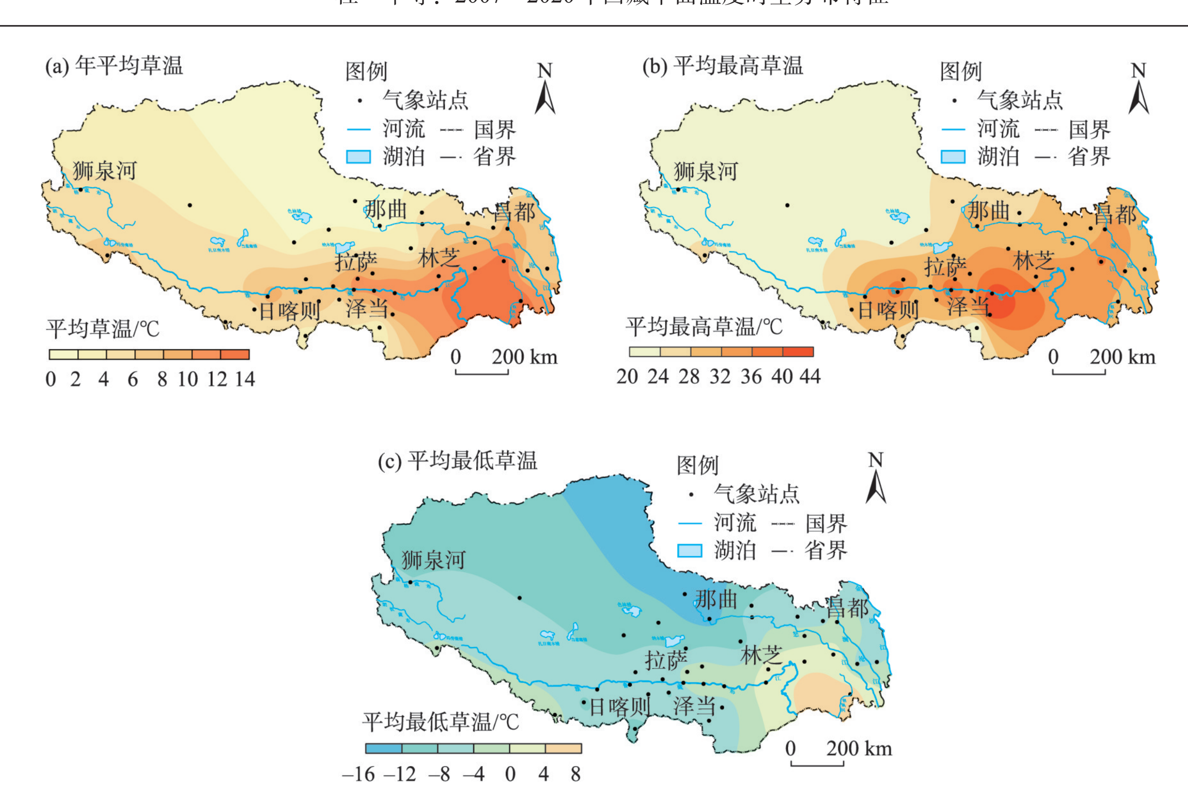


图2　西藏草温空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of grass surface temperature

通过计算年、季平均草温与平均气温、平均地表温度空间分布的相似系数 $\cos\theta_{12}$ [20]（为1时表示完全相似，为−1时表示完全相反，为0时表示完全不相似。正值越大越相似，负值越大越相反），分析发现，除冬季平均草温与平均地表温度的相似系数为0.887，其他季节平均草温与平均气温、平均地表温度的相似系数在0.987~0.991之间，这说明西藏平均草温与平均气温、平均地表温度的空间分布非常相似。

分析草温与地理参数（经纬度、海拔高度）的相关性发现（表1），除夏季外，西藏年、季平均草温分别与经度、纬度呈显著的正相关（$P<0.05$）和负相关（$P<0.01$），即经度每增加1°E，季平均草温升高0.29~0.40 ℃，其中冬季最大，其次是秋季，为0.31 ℃，春季最小；年平均草温升高0.29 ℃；纬度每增加1°N，季平均草温降低1.22~1.76 ℃（冬季最大，秋季最小），年平均草温降低1.17 ℃。而一年四季平均草温都

表1　西藏年、季草温与地理参数的相关系数

Tab. 1　Correlation coefficients between annual and seasonal average grass surface temperature and geographical location in Tibet

地理参数	草温	春季	夏季	秋季	冬季	年
经度	平均草温	0.329*	0.188	0.372*	0.411**	0.348*
	平均最高草温	0.315*	0.367*	0.410**	0.474**	0.407*
	平均最低草温	0.430**	0.303	0.456**	0.350*	0.396*
纬度	平均草温	−0.425**	−0.185	−0.422**	−0.525***	−0.415**
	平均最高草温	−0.290	−0.068	−0.446**	−0.480**	−0.359*
	平均最低草温	−0.384*	−0.350*	−0.304	−0.345*	−0.362*
海拔高度	平均草温	−0.822***	−0.777***	−0.908***	−0.901***	−0.891***
	平均最高草温	−0.355*	−0.412**	−0.541***	−0.586***	−0.491**
	平均最低草温	−0.942***	−0.943***	−0.948***	−0.881***	−0.944***

注：*、**、***分别表示 $P<0.05$、$P<0.01$ 和 $P<0.001$。下同。

与海拔高度呈显著的负相关(P<0.001),即海拔高度每升高100 m,季平均草温降低0.44~0.70 ℃,以冬季降幅最大,夏季最小;年平均草温降幅为0.58 ℃·(100m)$^{-1}$。同样,平均最高、最低草温与地理参数有类似的相关性,其中,平均最低草温与海拔高度的负相关关系最为明显(P<0.001),随着海拔高度每升高100 m,季平均最低草温降低0.60~0.88 ℃(冬季最大,夏季最小),年平均最低草温降低0.77 ℃。

此外,进一步分析了四季和年平均逐小时草温与地理参数(经纬度、海拔高度)的相关系数(图表略),结果显示,一年四季平均逐小时草温与海拔高度都存在显著的负相关关系(P<0.01),相关系数的绝对值在0.47以上,以07:00相关系数最高,除冬季为0.83外,其他季节大于0.92。海拔高度平均每升高100 m,年平均逐小时草温降低0.39~0.68 ℃,其中07:00草温降幅最大,18:00最小。除夏季外,年、季平均逐小时草温与纬度也存在显著的负相关关系(P<0.05),纬度每增加1°N,年平均逐小时草温降低0.80~1.94 ℃,其中14:00降幅最大,20:00最小。在经度方面,只有夏季07:00—13:00和春、秋、冬3季以及年0:00—15:00的草温与经度存在显著的正相关关系(P<0.05),经度每增加1 °E,年平均逐小时草温升高0.25~0.54 ℃(10:00最大,02:00最小)。

2.2 草温的时间分布

草温的变化主要取决于太阳辐射及近地层大气的热量交换,草层高度、密度也会影响草温传感器的热量交换程度,因昼夜和四季的更替,草温也会出现明显的日变化和年变化[8-9]。

2.2.1 草温的日变化 通过分析2007—2020年7个地市代表站(图3)和31个县气象站点(图略)四季逐小时草温的变化,西藏日最低草温出现时间受时差、地表状况的影响,季节差异较为明显,春季最低草温仅阿里地区西部(狮泉河、普兰)出现在08:00,其他站点均出现在07:00。夏季最低草温只有狮泉河出现在08:00,昌都市大部、波密、嘉黎、班戈等21%的站点出现在06:00,其余站点都出现在07:00。秋季61%的站点出现在07:00,主要分布在昌都市、林芝市、那曲市和阿里地区西部;剩余39%的站点出现在08:00。在冬季,有18%的站点出现09:00,主要包括阿里地区、申扎、定日和聂拉木;其他站点均出现在08:00。

各站日最高草温出现时间较为分散,但主要位于13:00—15:00。春季最高草温有87%的站点出现在13:00—14:00,阿里地区大部、定日、南木林、日喀则等13%的站点出现在15:00。在夏季,95%的站点日最高草温出现在14:00—15:00,以14:00居多;只

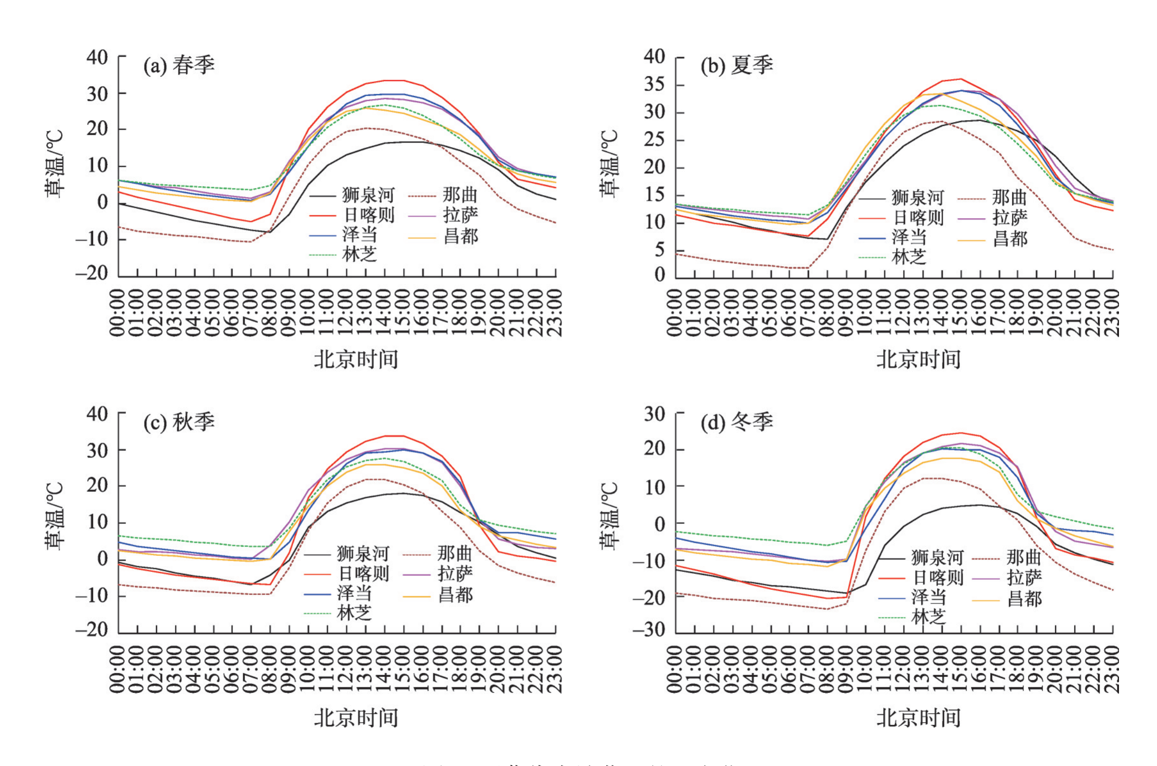


图3 西藏代表站草温的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of the grass surface temperature at representative stations in Tibet

有狮泉河、改则2个站出现较晚，为16:00。秋季有82%的站点日草温最大值出现在14:00—15:00，剩余18%的站点出现在13:00，主要位于昌都市西北部、那曲市东部。冬季日最高草温出现在14:00—15:00的站点数占87%；聂拉木、错那出现时间较早，为13:00，而阿里地区出现时间较晚，在16:00。

从西藏四季平均草温日变化来看（图4），最高值均出现在14:00，最低值出现在07:00—08:00，其中冬季为08:00。08:00—14:00草温为升高阶段，平均每小时升高3.4~5.1 ℃，以冬季最为明显，这是因为日出后总辐射迅速增加，使草温快速升温，至14:00达到最高。15:00—21:00草温为下降阶段，平均每小时降低2.8~3.6 ℃，其中冬季降幅最快，其次是秋季，夏季最慢。21:00至次日08:00降温较为缓慢，平均每小时降低0.9~1.3 ℃，冬季仍最大，春季次之，夏季最小。

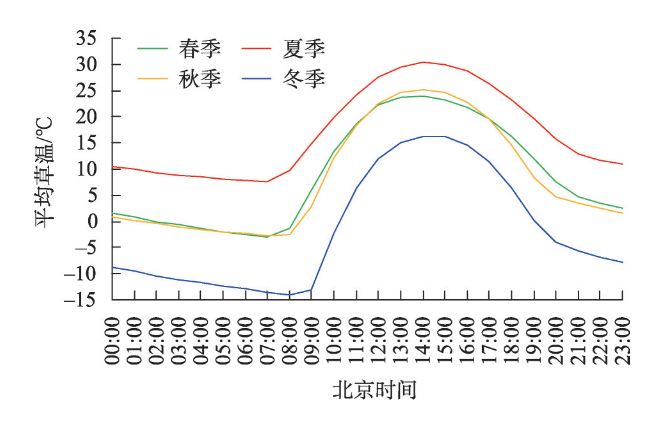


图4　西藏四季平均草温的日变化

Fig. 4　Diurnal variation of average grass surface temperature in four seasons in Tibet

2.2.2　草面温度的月变化　如图5a所示，西藏各站平均草温的月变化曲线呈单峰型。峰值出现在6月或7月，月平均草温为11.1~22.4 ℃（八宿最高，错那最低），其中沿雅鲁藏布江一线、八宿、芒康等34%的站点出现在6月，其他66%站点均出现在7月。月平均草温的最低值为−13.2~5.4 ℃，所有站都出现在1月。就西藏平均而言（图5b），月平均草温峰值出现在7月，为16.8 ℃；最低值出现在1月，为−4.6 ℃；草温年较差为21.4 ℃，较气温年较差偏高3.1 ℃。

各站月平均最高和最低草温的变化均呈单峰型（图略），平均最高草温的峰值出现在6—8月，其中沿雅鲁藏布江一线、拉萨市北部、隆子、嘉黎等45%的站点出现在6月，阿里地区、那曲市中西部、日喀则市南部等29%的站点在7月，其余26%的站点在8月。月平均最高草温的谷值，除隆子站在12月外，其他各站都出现在1月。平均最低草温的峰值出现在7—8月，仅浪卡子站出现在8月，其他各站均出现在7月；谷值除泽当、聂拉木出现在12月，其余站点出现在1月。就平均而言（图5b），西藏月平均最高和最低草温的峰值都出现在7月，分别为38.5 ℃和7.5 ℃；谷值也均出现在1月，分别为19.2 ℃和−18.3 ℃；平均草温日较差达到35.7 ℃，远大于气温日较差，偏高21.6 ℃。

2.2.3　草温的季节变化　西藏及其76%站点的平均草温变化表现出夏季>春季>秋季>冬季的气候特征，其余24%的站点呈现为夏季>秋季>春季>冬季的特点，这些站点主要位于阿里地区西南部、昌都市南部、聂拉木、错那、米林和察隅等地。各站月平

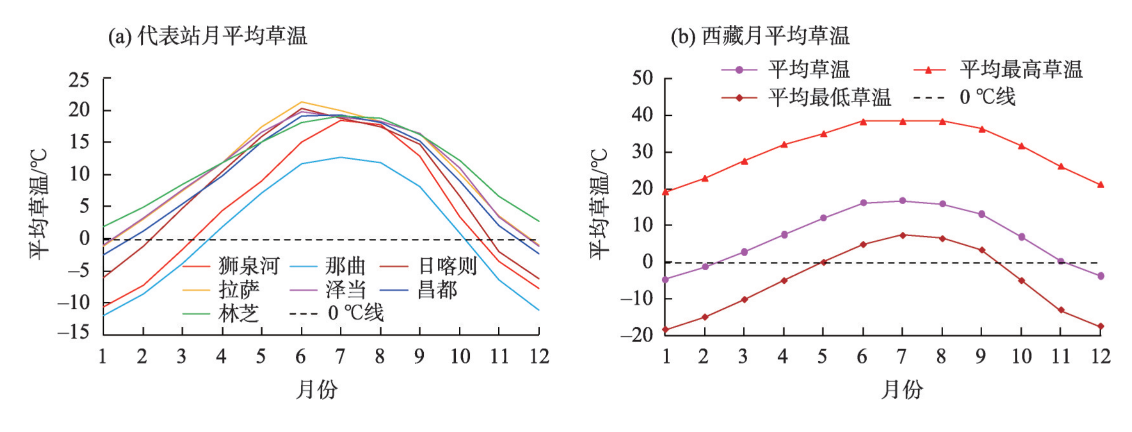


图5　代表站平均草温及西藏平均草温的月变化

Fig. 5　Monthly variations of the average grass surface temperature in the representative stations and average grass surface temperature in Tibet

均最高、最低草温均以夏季最大、冬季最小；仅在波密、察隅、聂拉木和错那4个站上，平均最高草温显现为夏季>秋季>春季>冬季的季节变化特征，其他各站为夏季>春季>秋季>冬季。平均最低草温呈现为夏季>春季>秋季>冬季的季节变化特征的站点占37%，主要分布于聂拉木至错那一带、沿雅鲁藏布江一线、昌都、林芝等地；其他站点呈现为夏季>秋季>春季>冬季的特点。这也说明，草温的季节变化特征不仅与太阳高度角的高低、日照长短关系密切，还与测站下垫面的植被状况有关。

2.3 草温与气象要素的关系

2.3.1 草温与气温的关系 气温、地表温度是影响草温的主要因子。吴佳佳等[5]指出地表温度、近地表温度、气温可直接或间接影响植物群落温度，植物群落温度主要受草本植物顶层的近地表温度影响较大。

通过分析西藏逐月平均草温与平均气温的相关系数(表2)，结果显示，各月相关系数为0.95~0.99(P<0.001)，说明草温和气温之间具有显著的正相关关系，即气温越高，草温就越高。

在月变化中(图6)，西藏大部分月份平均草温比平均气温高，其中6月草温与气温之差(简称草气温差)最大，为3.2 ℃；1、11月和12月草温则低于气温0.2~0.6 ℃，以12月偏低最明显；但二者年内变化一致，最高值均出现在7月，最低值出现在1月；夏季草气温差最大(3.0 ℃)，其次是春季草气温差(2.3 ℃)，冬季草温接近气温(−0.1 ℃)。就最高、最低温度而言，草温的变幅比气温大，月平均最高草温比月平均最高气温偏高15.3~20.2 ℃，其中4月草气温差最大，1月草气温差最小；而月平均最低草温较月平均最低气温偏低0.7~5.8 ℃，以1月和12月草气温差最大，7月草气温差最小。就其原因是因为气温传感器安装在离地面1.5 m高度处的百叶箱内，百叶箱既可以防止太阳对仪器的直接照射，也可免受风、雨、雪等的影响，故气温变化明显小于草温，这也说明在草温与气温之间既有关联又有差异[9,15]。

2.3.2 草温与地表温度的关系 表2给出了西藏逐月平均草温与平均地表温度的相关系数，两者的相关系数为0.93~0.98(P<0.001)，表明草温与地表温度之间存在非常显著的正相关关系。从月变化看

表2 西藏平均草温和气象要素的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between average grass surface temperature and meteorological elements in Tibet

气象要素	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均气温	0.97***	0.98***	0.99***	0.98***	0.97***	0.97***	0.98***	0.97***	0.98***	0.98***	0.96***	0.95***
平均地表温度	0.97***	0.98***	0.97***	0.95***	0.94***	0.93***	0.93***	0.94***	0.96***	0.96***	0.96***	0.96***
平均总云量	0.20	0.24	0.27	0.23	0.09	−0.02	0.03	0.10	0.21	0.30	0.33*	0.11
平均低云量	0.25	0.28	0.26	0.19	0.01	−0.12	−0.17	−0.09	0.11	0.29	0.34*	0.19
降水量	0.09	0.20	0.29*	0.24	0.06	−0.16	0.02	−0.06	0.02	0.26	0.29*	0.19
平均风速	−0.52***	−0.40**	−0.48**	−0.71***	−0.70***	−0.52***	−0.35*	−0.39*	−0.58***	−0.69***	−0.63***	−0.61***
积雪日数	−0.45**	−0.54***	−0.61***	−0.59***	−0.57***	−0.51**	−0.45**	−0.46**	−0.45**	−0.49**	−0.36*	−0.35*
积雪深度	−0.19	−0.13	−0.29	−0.56***	−0.62***	−0.40**	−0.33**	−0.30	−0.39*	−0.58***	−0.40**	−0.24

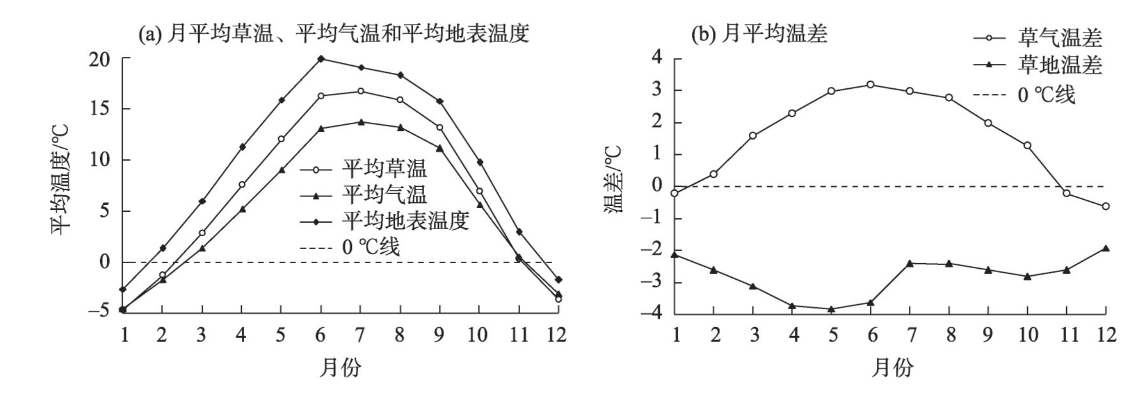


图6 西藏平均草温、平均气温和平均地表温度及其温差的月变化

Fig. 6 Monthly variations of average grass surface temperature, mean air temperature and mean ground temperature in Tibet

(图6)，平均草温明显低于平均地表温度，其中5月草温与地表温度之差(简称草地温差)最大，达3.8 ℃，12月草地温差最小，为1.9 ℃；春季草地温差最大，夏季草地温差次之，冬季草地温差最小。二者年内变化均呈单峰型，但峰值出现月份不同，地温出现在6月，草温晚于地温1个月；谷值两者均出现在1月。在最高、最低温度上看(图略)，月平均最高草温较月平均最高地表温度偏低1.8~11.3 ℃，以5月相差最大，12月相差最小；除4、5月平均最低草温比平均最低地表温度略偏高0.2 ℃，7月无偏差外，其他各月平均最低草温较平均最低地表温度偏低0.2~1.9 ℃，以11月偏差最大，6月差值最小，总体来看最低草温与地表温度比较接近，尤其是2—7月。

2.3.3 草温与云量的关系　在空间分布上来看(表2)，除11月平均草温与平均总云量、平均低云量呈显著的正相关外(P<0.05)，其他月份两者的相关性不显著。

从草温和云量日变化来分析两者的关系，以拉萨为例，将2007—2020年逐小时草温资料按晴天(低云量<3成，且全天日照时数≥7 h)、多云(3成≤低云量<7成，且3 h≤全天日照时数<7 h)、阴天(低云量>7成，且全天日照时数<3 h)进行分类，按1、4、7月和10月分别代表冬、春、夏季和秋季，得到拉萨四季平均草温日变化，以分析不同天空状况下草温的日变化(图7)。

从图7可看出，晴天状况下，白天辐射强，草温升高快；夜间辐射冷却较为强烈，草温下降，致使草温日变化大，日较差为26.9~35.0 ℃，以秋季最大，冬季次之(34.2 ℃)，夏季最小。多云天气，云层阻挡了太阳辐射，辐射强度变化较为缓慢，草温日变化小于晴天状况，日较差为20.9~28.1 ℃，以冬季最大，春季次之(24.8 ℃)，夏季最小。阴天、白天地面接收太阳辐射少，草温低于晴天和多云的；夜间辐射冷却强，草温高于晴天和多云的，这在冬季特别明显；阴天下的草温日变化也较小，日较差为11.7~16.9 ℃，其中春季最大，冬季最小。以上分析表明，草温因云量而变，白天云量减少时，辐射增强，草温上升明显；夜间云量减少时，辐射冷却较为强烈，草温骤降。相反，白天云量增加，草温随之降低；夜间随着云量的增加，草温也趋于升高。

2.3.4 草温与降水量的关系　由于草温传感器是暴露在地表之上，受天气现象的影响较大，尤其是降雨或降雪天气，故草温的变化与降水量有着密切的关系。若有降水时，雨滴或雪花落在温度传感器上，因水的热容量大，水滴和温度传感器、草面进行热量交换时，感应器温度下降，草温也降低。

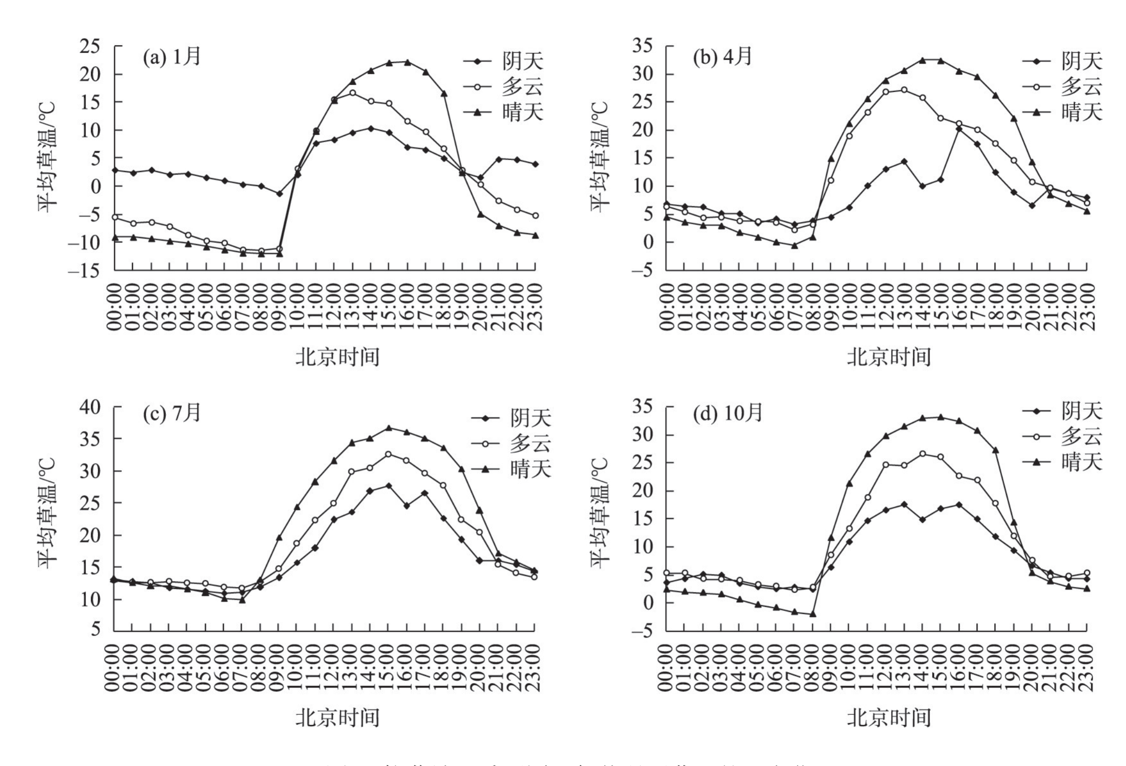


图7　拉萨站四季不同天气状况下草温的日变化

Fig. 7　Daily variations of grass surface temperature under different weather conditions in four seasons at Lhasa station

利用38个气象站点2007—2020年5—9月平均逐小时草温和降水量资料分析了两者的关系，结果显示86.8%的站点草温与降水量有着显著的负相关关系（P<0.05），相关关系为-0.406~-0.929；两者关系不显著的站点主要包括安多、班戈、隆子、左贡和芒康（P>0.05）；就西藏平均而言，逐小时草温与降水量存在显著的负相关关系（图8a），相关系数达-0.871（P<0.001）。这说明西藏绝大部分站点降水量大，草温就低，反之，降水量小，草温高。此外，还发现"一江两河"地区各站逐小时草温与降水量不仅存在极为显著的线性负相关关系（P<0.001），还存在极为显著的二次曲线关系（图8b~e，P<0.001），当降水量小于0.6 mm时，草温随降水量的增大，快速降低；当降水量超过0.6 mm时，草温随降水量的增加而升高。

但在空间分布上（表2），只有3月和11月平均草温与降水量有着较显著的正相关（P<0.05），其他月份两者的相关性不显著。

2.3.5 草温与风速的关系 风速的变化，会改变空气及近地面物体的温度，因此风对草温有直接影响。从空间分布上来看（表2），各月平均草温与平均风速呈显著的负相关（P<0.05），尤其是4月相关系数达到0.71，显著性P<0.001。风速大，空气流动大，草温低；反之，风速小，空气流动小，草温高。

2.3.6 草温与积雪的关系 表2给出了各月平均草温与积雪日数的相关系数，为-0.35~-0.61（P<0.05），两者存在着显著的负相关关系，即积雪日数多，草温低；反之，积雪日数少，草温高。

不同积雪深度对草温也有影响，如表2所示，各月平均草温与积雪深度的相关系数为-0.19~-0.62，

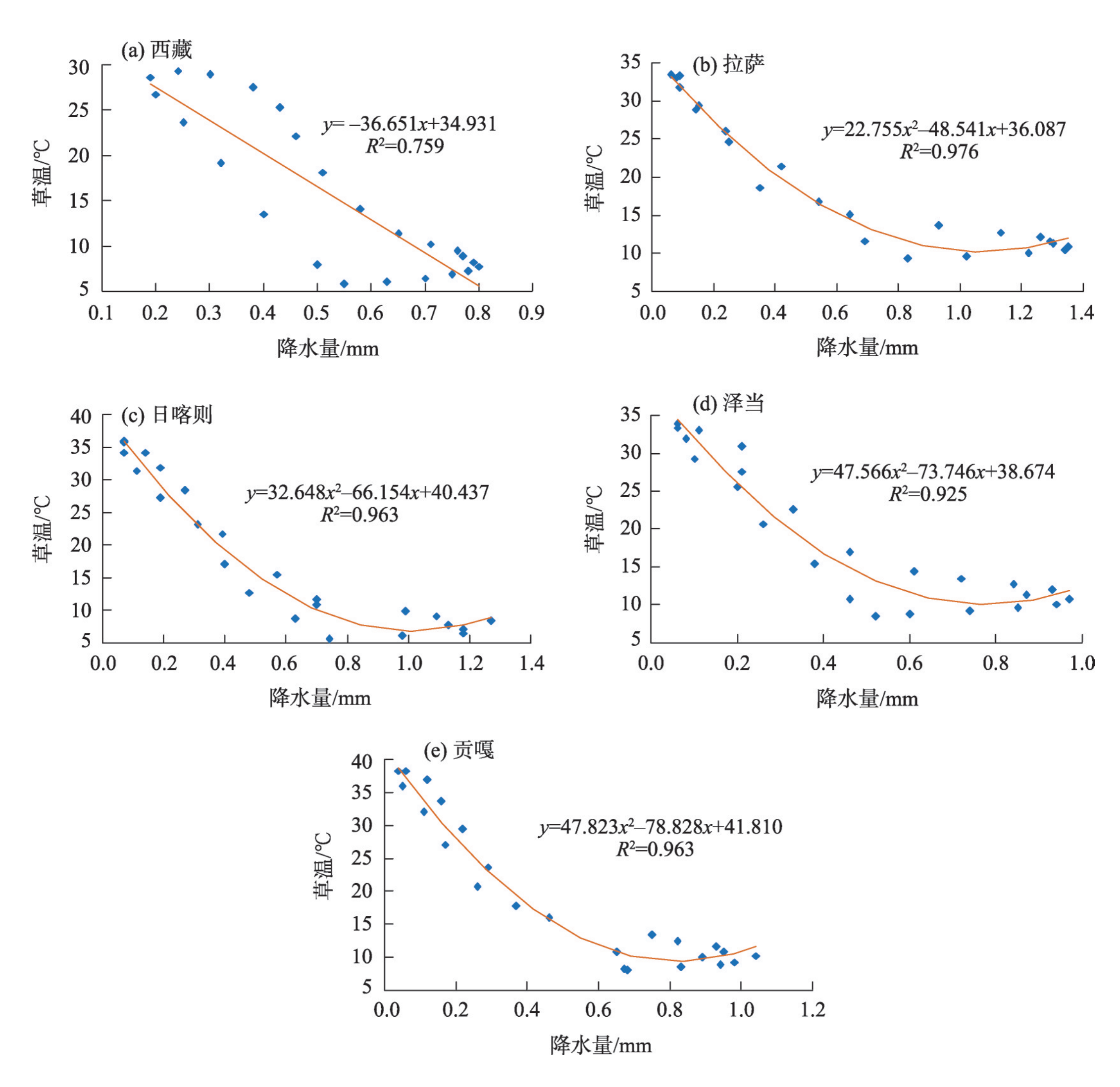


图8 西藏及"一江两河"代表站逐小时草温与降水量的散点图

Fig. 8 Relationships between hourly grass surface temperature and precipitation in representative stations of the Brahmaputra River and its two tributaries of Tibet

两者存在着负相关关系，即积雪深度大，草温低；反之，积雪深度小，草温高。其中4、5月和10月达到了极显著水平（$P<0.001$）；冬季相关性不显著。

3　讨论与结论

3.1　讨论

（1）受太阳辐射日变化的影响，西藏绝大部分站点近地面气温在16:00—17:00出现最高值，日出前后07:00—09:00出现最低值[21]。而草温的最高值出现在14:00—15:00，要早于气温；最低值出现在07:00—08:00，与气温接近，原因之一是因为日出后草层因总辐射吸收的热量高于草面水汽蒸发与草面有效辐射所支出的热量，使草温快速上升；其二是由于草温传感器更接近地表，吸收热量较快。与周边的新疆[8]、青海[9]比较，草温最低值出现时间比青海偏晚1 h，与新疆相同；最高值出现时间与青海相同，较南疆偏早1 h。

（2）冬季草面枯黄稀疏，下垫面状况的改变致使草温接近于地温，但低于地温。与气温相比，阿里地区、那曲市西部、昌都市中南部、林芝市和南部边缘地区草温高于气温，其他各地草温低于气温。分析了草温和气温之差与经纬度、海拔高度的相关，发现相关性均不显著，这也说明草温受下垫面状况的影响较大。冬季，当有降雪且未掩盖草层时，测定的仍为草温；当积雪大于6 cm时，观测的是雪面（中）温度，会直接影响草温的测值。因此，冬春季有积雪时，因尽快清除积雪，以保证草温的真值。

（3）太阳辐射是大气、地表和植物温度的直接来源。吴佳佳等[5]研究认为，环境温度直接或间接影响植物温度，气温、近地表温度、地表温度对地表植物群落温度的总直接作用为13.89%，总间接作用为21.52%，这说明大气、地表温度和植物群落温度是一个温度循环系统。西藏各站三者间的温度循环系统是如何相互作用的有待下一步研究。

3.2　结论

（1）西藏年平均草温总体上呈自东南向西北递减的分布，与气温分布一致。季平均草温、平均最高草温、平均最低草温的分布格局与年尺度具有基本一致的特点，都呈现出较明显的纬度地带性和海拔垂直地带性。除夏季外，年、季平均草温分别与经度、纬度呈显著的正相关和负相关；一年四季平均草温都与海拔高度有着显著的负相关关系。

（2）西藏草温日最高值均出现在14:00，日最低值出现在07:00—08:00，其中冬季为08:00。月平均草温呈正弦波曲线变化，7月最高，1月最低；草温年较差为21.4 ℃，较气温年较差偏大3.1 ℃；年平均草温日较差达35.7 ℃，远高于气温日较差，偏大21.6 ℃。西藏76%站点的平均草温变化表现为夏季>春季>秋季>冬季的气候特征。

（3）西藏月平均草温与平均气温、平均地表温度的相关系数在0.92以上，存在极为显著的正相关关系。草气温差以夏季最大，其次是春季、冬季两者比较接近。草地温差以春季最大，夏季次之，冬季最小。

（4）在空间分布上，平均草温与平均总云量、平均低云量仅在11月存在显著的正相关，其他月份两者的相关性不显著。与降水量的关系，只在3月和11月有着较显著的正相关，其他月份相关性不显著。各月平均草温与平均风速、积雪日数均存在显著的负相关关系；除冬季外，草温与积雪深度有着显著的负相关关系。5—9月，86.8%的站点逐小时草温与降水量有着显著的负相关关系。

致谢：西藏自治区气候中心牛晓俊硕士提供的GIS制图。

参考文献（References）

[1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003. [China Meteorological Administration. Specification for surface meteorological observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.]

[2] 黄良美, 黄海霞, 项东云, 等. 南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1411-1420. [Huang Liangmei, Huang Haixia, Xiang Dongyun, et al. The diurnal change of air temperature in four types of land cover and urban heat island effect in Nanjing, China[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(5): 1411-1420.]

[3] 彭江良, 吴息, 江志红. 南京冬季城、郊下垫面能量平衡特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 21-29. [Peng Jiangliang, Wu Xi, Jiang Zhihong. Characteristics analysis of energy budget over urban and suburban underlying surfaces in Nanjing[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(1): 21-29.]

[4] 吴佳佳, 李素英, 杨理, 等. 锡林浩特地区草原植物温度与地表温度相关性研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(3): 263-267. [Wu Jiajia, Li Suying, Yang Li, et al. Correlation between grassland plant temperature and land surface temperature in Xilinhot region[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University

(Natural Science Edition), 2019, 48(3): 263-267.]

[5] 吴佳佳, 李素英, 周舆, 等. 典型草原地区环境温度对植物温度的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 156-162. [Wu Jiajia, Li Suying, Zhou Yu, et al. Effects and respond of plant temperature on ambient temperature in typical grassland areas[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(1): 156-162.]

[6] 程爱珍, 何秋香, 黄理, 等. 气象要素对草面温度的影响分析及其质量控制方法[J]. 气象应用与研究, 2009, 30(1): 70-72. [Chen Aizhen, He Qiuxiang, Huang Li, et al. Analysis on influence of meteorological elements on grass surface temperature and quality control method[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2009, 30(1): 70-72.]

[7] 张亚哲, 高业新, 冯欣. 华北平原中部草面温度变化特征[J]. 气象应用与研究, 2012, 33(4): 51-53. [Zhang Yazhe, Gao Yexin, Feng Xin. Variation characteristics of the grass temperature in the central North China Plain[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2012, 33(4): 51-53.]

[8] 李秦, 古丽格娜·海力力, 赵玲, 等. 新疆草面温度的特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(2): 1-5. [Li Qin, Hailili Guligena, Zhao Ling, et al. Analysis on the features of grass-surface temperature in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(2): 1-5.]

[9] 马汝忠, 张焕平, 马小萍, 等. 草面温度的变化特征及影响因素分析[J]. 青海环境, 2017, 27(2): 63-68. [Ma Ruzhong, Zhang Huanping, Ma Xiaoping, et al. Characteristics of changes in grass surface temperature and analysis of influencing factors[J]. Journal of Qinghai Environment, 2017, 27(2): 63-68.]

[10] 温显罡, 马舒庆, 杜波, 等. 草温与露点温度对结露和结霜指示性分析[J]. 气象, 2012, 38(6): 745-750. [Wen Xiangang, Ma Shuqing, Du Bo, et al. Indicative analysis of grass temperature and dewpoint temperature to the occurrence of dew and frost[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(6): 745-750.]

[11] 巴珠, 贡觉群培. 泽当城市草面温度变化规律初探[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 14161-14162. [Ba Zhu, Gongjuequnpei. Primary exploration on variation law of grass surface temperature in Zedang City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 14161-14162.]

[12] 杨媚. 尼木县地表温度与草面温度的对比分析[J]. 农业与技术, 2015, 35(19): 153-155. [Yang Mei. Comparative analysis of ground temperature and grass surface temperature in Nimmo County[J]. Agriculture and Technology, 2015, 35(19): 153-155.]

[13] 朴世龙, 方精云. 最近18年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 294-302. [Piao Shilong, Fang Jingyun. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 294-302.]

[14] 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等. 2000—2014年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 592-601. [Xu Jie, Chen Huiling, Shang Shasha, et al. Response of net primary productivity of Tibetan Plateau vegetation to climate change based on CEVSA model[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 592-601.]

[15] 韩炳宏, 周秉荣, 颜玉倩, 等. 2000—2018年间青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1651-1658. [Han Binghong, Zhou Bingrong, Yan Yuqian, et al. Analysis of vegetation coverage change and its driving factors over Tibetan Plateau from 2000 to 2008[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1651-1658.]

[16] 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3208-3218. [Zhuoga, Chen Sirong, Zhou Bing. Spatio-temporal variation of vegetation coverage over the Tibetan Plateau and its responses to climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3208-3218.]

[17] 王冰, 李启权, 罗琳, 等. 1981—2011年川南山区地温和气温的变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1322-1329. [Wang Bing, Li Qiquan, Luo Lin, et al. Change characteristics of soil surface temperature and air temperature in the mountainous region of southern Sichuan from 1981 to 2011[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1322-1329.]

[18] 王丽平, 段四波, 张霄羽, 等. 2003—2018年中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1299-1308. [Wang Liping, Duan Sibo, Zhang Xiaoyu, et al. Spatio-temporal distribution and variation characteristics of annual maximum land surface temperature in China during 2003—2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1299-1308.]

[19] 杜军, 胡军, 尼玛吉, 等. 1981—2017年西藏"一江两河"流域5厘米地温及其界限温度时空变化特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1821-1834. [Du Jun, Hu Jun, Nimaji, et al. Spatial-temporal change of mean soil temperature and its critical temperature at 5 cm depth in the region of the Yarlung Zangbo River and its two tributaries of Tibet during 1981—2017[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1821-1834.]

[20] 杜军, 马玉才. 西藏高原降水变化趋势的气候分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 375-382. [Du Jun, Ma Yucai. Climatic trend of rainfall over Tibetan Plateau from 1971 to 2000[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 375-382.]

[21] 杜军, 马鹏飞, 潘多. 1981—2014年西藏各时次气温的变化趋势分析[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 422-432. [Du Jun, Ma Pengfei, Panduo. Spatial-temporal change of air temperature at 02, 08, 14 and 20 Bejing time over Tibet during 1981—2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 422-432.]

Spatial and temporal distribution of the grass surface temperature in Tibet from 2007 to 2020

DU Jun[1,2,3], GAO Jiajia[1,2,3], WANG Ting[3], Phuntsoksamten[1,2]

(1. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa 850001, Tibet, China;
2. Tibet Key Laboratory of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa 850001, Tibet, China;
3. Field Science Experiment Base for Comprehensive Observation of Atmospheric Water Cycle in Mêdog, CMA, Mêdog 860700, Tibet, China)

Abstract: Based on grass surface temperature (GST), air temperature (AT), ground temperature (GT), cloudiness and precipitation et al data from 38 stations in Tibet, China from 2007 to 2020, the spatial and temporal variation characteristics of GST and its influencing factors were analyzed using climate statistical diagnostic methods, for scientific study of local grassland ecosystems and professional meteorological services. The results showed that the annual mean GST in Tibet showed a decreasing distribution from southeast to northwest. There was a significant negative correlation between GST and altitude, with each 100 m increase in altitude, the seasonal mean GST decreased by 0.44−0.70 ℃, and the annual mean GST decreased by 0.58 ℃; there was also a significant curve relationship with latitude, and the annual and seasonal GST increased (decreased) with increasing latitude in the area south (north) of 29.3°N. The GST of each station showed a peak and a valley of daily variation, the daily minimum value occurred at 07:00—08:00 Beijing time (BJT), the daily maximum value occurs at 14:00 BJT; the monthly average minimum value happened in January, the monthly average maximum value appeared in June or July. The seasonal variation of GST, 76% of the stations showed the climatic characteristics of summer> spring>autumn>winter. The annual range of GST in Tibet was 21.4 ℃, which was 3.1 ℃ larger than the annual range of AT; the diurnal range of GST reached 35.7 ℃, much higher than the diurnal range of AT, which larger was 21.6 ℃. The difference value between GST and AT was the largest in summer, followed by spring, and the two were closer in winter; the difference value between GST and GT was the largest in spring, followed by summer, and the smallest in winter. In spatial distribution, the monthly mean GST was significantly positively correlated with AT and GT, and negatively correlated with mean wind speed and snow days. There was a significant negative correlation between the effect of snow depth on GST except in winter. In most months, the relationship between mean GST and total cloudiness, low cloudiness and precipitation was not significant. 86.8% of the stations had significant negative correlation between hourly GST and precipitation from May to September.

Key words: spatial and temporal distribution; grass surface temperature; influence factor; Tibet